

道路網に対する領域分割木を用いた範囲問い合わせ手法の提案

蒲原 智也[†] 上島 紳一[†]

[†] 関西大学大学院総合情報学研究科 〒569-1095 大阪府高槻市霊仙寺町 2-1-1

E-mail: †{fa8d001,ueshima}@edu.kansai-u.ac.jp

あらまし 近年、道路網をグラフとして捉えた空間データベースの研究が盛んである。我々は、ネットワークボロノイ図と確率的手法を利用しながら、グラフを分割して階層化して構成した領域分割木を提案している。提案木は、最下位の領域分割からボトムアップに上位の階層を生成することにより、上位の階層がより広い範囲の領域となる。また、上位階層の領域と下位の領域が包含関係を満たす構造となっており、道路網応用に適した構成を持っている。本稿では、中心から一定範囲内のすべてのオブジェクトを抽出する Distance Range Query(DRQ) 問題に対して提案木構造を適用し、その有効性について議論する。提案手法では、領域間の境界点に着目することにより、領域分割木の生成ならびに問合せ処理がリスト処理に帰着され、効率的な計算が可能となっている。また多くの従来手法と異なり、提案木が、道路網と領域関係をもとに構成されているため、問合せ範囲が与えられた時、多種類のオブジェクトに対して同時に問い合わせを実行することができる特徴を持つ。

キーワード ネットワークボロノイ図、範囲問合せ、領域分割木

Applying Graph-Partitioning Tree to Distance Range Queries in Road Networks

Tomoya KAMBARA[†] and Shinichi UESHIMA[†]

[†] Graduate School of Infomatics, Kansai University 2-1-1 Ryozenji-cho, Takatsuki-shi, OSAKA 569-1095, Japan

E-mail: †{fa8d001,ueshima}@edu.kansai-u.ac.jp

Abstract Recently, much attention has been focussed on spatial databases, where road networks are viewed as graphs. In this paper, the authors propose a graph-partitioning tree, as spatial index tree of a given road network. The tree is generated by dividing a given graph using Network Voronoi Diagram, combined with a method of random node selection, and is layered into a hierarchy in a bottom-up manner from the ground layer of road network. The tree holds range inclusion property, in the sense that region of super node includes regions of sub nodes, which enables to develop various map applications for road networks, including range queries, kNN queries, and so on. In this paper, the authors provide and discuss a scheme to apply the proposed tree to Distance Range Query(DRQ) problems, which extract all objects in a given radius from the given point on the graph. Focussing boundaries among regions explicitly, the proposed tree is implemented and processed in terms of list data structure, for given queries in road network. Different from the existing methods, the proposed tree is considered to possess spatial relationships between subregions of a given road network, and is build without specifying objects that reside in. Hence any type of objects can be queried with this single graph-partitioning tree when their geographical locations are specified.

Key words Network Voronoi Diagram, Distance Range Query, Graph-Partitioning Tree

1. はじめに

近年、地理情報システムや道路網応用の研究分野で、最短経路探索、範囲問合せ (DRQ)、k-最近傍探索問題 (kNN) などに有効な空間索引の研究が注目を集めている [1] ~ [4]. これらの研

究では、店舗などの位置の固定したオブジェクトのみならず、移動体の位置などに対する問合せに答えるため、道路網をグラフとみなし、オブジェクトと道路網を分離した手法をとっている。

本稿においても、交差点をノード、交差点間を結ぶ道路を

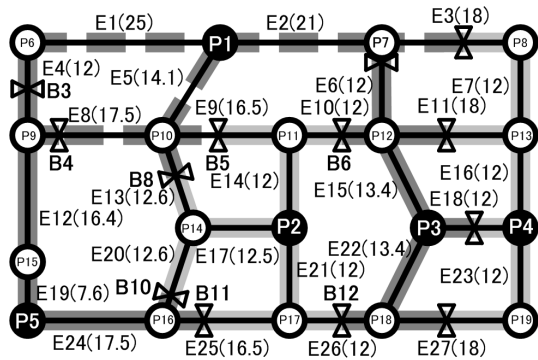


図1 母点集合 P_1, \dots, P_5 に対するネットワークボロノイ図
Fig. 1 Network voronoi diagram for generators P_1, \dots, P_5

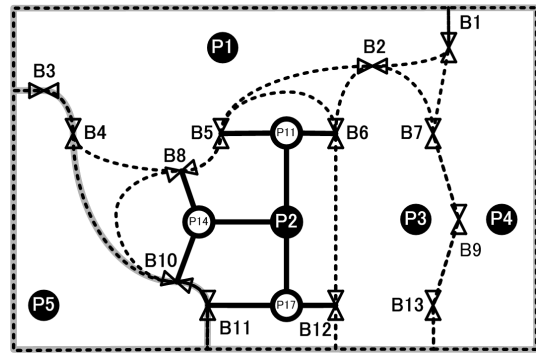


図2 P_1, \dots, P_5 の母点領域の隣接関係図
Fig. 2 Adjacency among generator regions for P_1, \dots, P_5

エッジとし、道路片の長さを重みとしたエッジ重み付き平面グラフとして道路網をモデル化する。これを分割して得られる部分グラフ群を用いた木構造を提案した [5]。この木構造では、2種類のネットワークボロノイ図 [6] ~ [8] を用いて、ランダムに選択した母点によるノード間距離を基準にしたグラフ分割を行う。隣接領域間を統合することで、対象道路網に対して、木の上位ノードを生成して、木をボトムアップに生成する。

各部分領域は、領域内・隣接領域間の最短経路、領域の大きさの指標などの3種類の空間索引をもつ。部分領域に対しては、部分領域を通過する経路と距離見積りを予め領域毎に計算しておくことに相当する。

この木構造に、対象となるオブジェクト集合を与えることで、範囲問合せを行う方法を提案する。本提案手法では、道路網データから木構造を事前に生成しておき、経路上に存在するオブジェクトの情報を後から付与することができる特徴を持つ。

これによって、1種類のオブジェクトに対して1つの構造を必要とする従来手法と異なり、複数の種類のオブジェクトが存在していても、唯一の構造で対応することができる。

また木構造とオブジェクト情報を分離することができ、両者のデータ更新をそれぞれに容易に行える利点がある。

2章では、ネットワークボロノイ図を利用した木構造のボトムアップ生成法を簡単に説明し、3章で木構造を利用した範囲問合せについて述べる。4章で関連研究について述べる。

2. 領域分割木

2.1 ネットワークボロノイ図による領域分割

道路網において、交差点をノード、道路片をエッジとみなした無向グラフ $G = (N, E)$ (N : ノード集合, $E \subseteq N \times N$: エッジ集合) を考える。更に、各エッジは重みを持ち、各ノード n は2次元での座標 $(n.x, n.y)$ を持つものとする。

[ノードネットワークボロノイ図] (以後、ノード NV 図) ノード NV 図は、母点以外の各ノードに対して最も近い母点 (ノードの所属母点という) を決定し、母点に関して G の全てのノードを分割した図をいう。

ノード NV 図の生成は、並列ダイクストラ法 [8] を用いる。これは、複数の母点をスタートノードとし、各ノードに対して、1つの所属母点を決定するダイクストラ法の拡張である。

[エッジネットワークボロノイ図] (以後、エッジ NV 図) G のエッジに関して、エッジ上の任意の地点から各母点への重みを考えれば、各地点の所属母点を決定することができる。この場合、1つのエッジすべての地点が同一母点に所属する場合と、1つのエッジの途中で所属母点が変わる場合がある。途中でエッジの所属母点が変わる地点を境界点といい、そのようなエッジを境界エッジという。図1では、 ∇ が境界点を示す。

[母点領域] 母点とその母点に所属するノードとエッジを集めてできる領域を母点領域と呼ぶ。つまり、各母点領域は、(i) 1つの母点、(ii) 母点に所属するノード、(iii) 母点に所属するエッジ、(iv) 領域の端を示す境界点、(v) 境界点をもつエッジの境界点までの部分から構成される。

ここで、母点領域間は、それぞれ有限個の境界点で、他の母点領域に隣接していることに注意する。図2は、母点 P_1 から P_5 に対する母点領域の隣接関係と、ある母点 P_2 の構成要素を示す。

各母点領域において、母点は、その母点領域の中心の役割を持ち、母点領域を代表する。提案している領域分割木においては、各母点が木の上位ノードを構成する。

2.2 母点領域の統合と空間索引

・母点領域の隣接関係の抽出

前節のグラフ分割で得られた母点領域をノードとして扱う。母点領域間の経路は、必ず境界点を通過するため、境界点を利用した経路で構成することができる。つまり、隣接する2つの母点領域間の境界点を接続部として、その境界点までのそれぞれの母点からの最短経路を用いて、ノードの隣接関係を結びエッジを構成できる。

前節で生成した境界点は、以降の階層化においては、その境界点を経由した経路として見る。

母点間を結び最短経路は、境界点毎に作成する (図3)。母点 P_1 と P_5 を結ぶ場合、他母点領域 (たとえば P_2 の母点領域) を経由する経路は考慮しない。以降、複数のグラフを構成するため、階層 i でのグラフ G を G_{i1} と表記する。

・母点領域の統合

G_{i1} において、各ノードは領域を示すため、2つ以上のノードを統合すれば、より広い領域を示すノードを生成できる。このため、 G_{i1} のノード集合の部分集合を、新たな母点集合とし

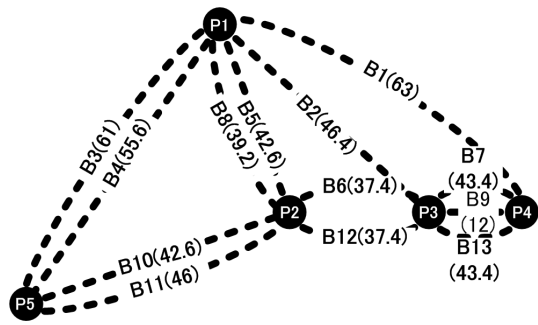


図 3 母点領域の隣接関係を示すグラフ (G_{11})

Fig. 3 Graph of adjacency among generator regions(G_{11})

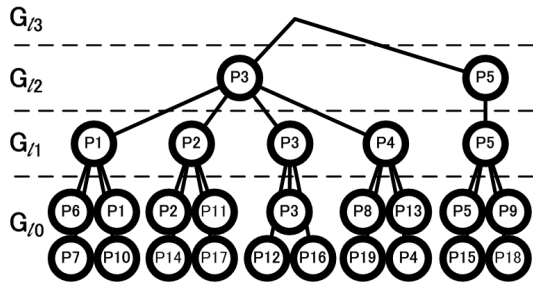


図 4 領域の包含関係を示す木構造表現

Fig. 4 Tree representation for inclusion relations of region

て与え、 G_{11} に対して、ノード NV 図を生成して、 G_{11} のノード集合を分割する。つまり、新たな母点集合に対する G_{11} のノードの母点への所属関係を一意に決定する。

また、母点となるノードは、自身に所属するノードの領域をすべて統合する。

次に、 G から G_{11} を構成した時と同様に、母点間の最短経路を境界点毎に求めれば、2つのノード P3, P5 を持つグラフ G_{12} を作成できる。

G_{12} では、 G_{11} 上に境界点を新たに生成するのではなく、原地図 (図 1) 上の境界点を利用する。つまり、統合前の領域の端の境界点の中から、統合により得られた領域の端を示す境界点を選ばれる。これにより、統合前の領域の境界点が、統合後の領域の境界点を含むため、領域間に包含関係を持たせることができる。

・階層化

ノードと母点領域を同一視することを行い、ノード NV 分割と統合を繰り返すことで、包含関係を維持した木構造をボトムアップに生成することができる。以下、全領域を包含するノードが発生するまで上位層の生成を繰り返す。図 4 は、ノードの所属関係、領域の包含関係を示した木構造である。

また、図 5 に階層毎に作成されたグラフを示す。 G_{10} (原地図) から G_{11} を生成するときの母点のランダム選択をおこない、ノード NV・エッジ NV 分割により、境界点が発生している。 G_{11} は、分割された領域間の経路を示し、これが上位層を生成する場合、分割対象となるグラフである。 G_{12} は、 G_{11} で上位層を生成した結果、得られたグラフである。

[空間索引]

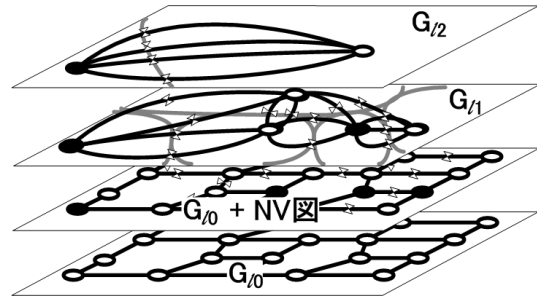


図 5 領域分割木の階層構造

Fig. 5 Hierarchical structure of graph-partitioning tree

提案している木構造では、分散型の空間索引として、各母点領域が次の 3 種を持つ。

(1) 各階層での隣接する母点領域間で求めた母点間の最短経路と距離

(2) 各階層での母点領域内で

- すべての境界点間の最短経路と距離
- すべての境界点と母点間の最短経路と距離

(3) 各階層での母点領域の大きさの指標

(1) は、前節において、階層化の手順の間に求められる。グラフ上でランダムな母点選択を行っても、実際に移動するのはグラフ上であるため、境界点を中心にした道路に沿った最短経路を常に求めておく必要がある。

(2) は、母点領域を外部から通過するための経路と距離である。また、母点を母点領域の代表点とみなして、該当する母点領域の境界点までの距離である。

(3) は、各階層の各母点領域において、その母点領域を横断する経路の最大経路長と最小経路長の 2 つの指標を用いる。

上記 (1) は、母点領域間の隣接関係によって、母点領域間の相対的な位置関係を表す。また、(2), (3) は、グラフ (道路網) に沿った距離索引である。

これらを、距離と位置関係に基づく空間索引とする。

3. 領域分割木を用いた範囲問合せ

[範囲問合せ] 原地図 G_{10} には、問合せの対象となる複数のオブジェクト集合がある。また、問合せの中心となるノードと、問合せ範囲となる距離 r が与えられる。

3.1 オブジェクト指標の生成

問合せの対象となる単一種類のオブジェクト集合が与えられる。

前章で構成した領域分割木は、最短経路探索に対応しているため、そのままの状態では、範囲問合せを実行することができない。そこで、母点領域に存在するオブジェクトの数を、その母点領域のパラメータの一つとして、集約していく。この集約は、各階層の各母点ごとに行い、最上位の層では、オブジェクトの総数となる。

例えば、図 1 の G_{10} において、ノード番号が 3 の倍数のノードにオブジェクトが存在するとしたときの各階層・母点領域でのオブジェクト数を図 6 に示す。

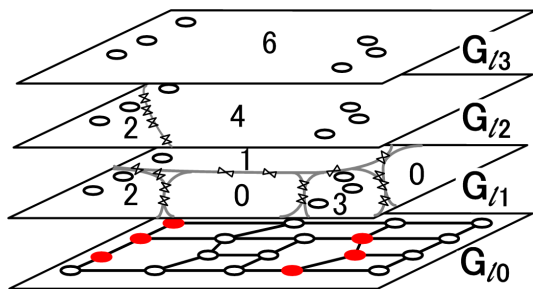


図 6 領域分割木の各階層における部分領域と対象オブジェクト数の関係

Fig.6 Relations of subregions and numbers of target objects in each layer of the graph-partitioning tree

このオブジェクト数の指標の生成の手順は、 G_{l_1} から上位の階層に向かって、順番に集約していく。たとえば、 G_{l_i} での指標を生成する場合、 $G_{l_{i-1}}$ での母点とその所属ノードのオブジェクト数を、 G_{l_i} でのノードに付加する。これを繰り返すことで、オブジェクトの領域に対する指標を生成することができる。

オブジェクト指標の生成が、領域分割木の生成と別に行う理由は、多種類のオブジェクト集合が存在した場合、通常的手法では、オブジェクトの種類ごとに、1つの構造を必要とするのに対して、提案手法では、複数のオブジェクトの種類に対して、1つの木構造で対応できるからである。

また他の利点として、更新を容易にすることが挙げられる。通常的手法では、ネットワークの更新・オブジェクト情報の更新が合った場合、どちらか一方でもあれば、全体を更新する必要がある。提案手法では、ネットワークの更新は、木構造の修正でよく、オブジェクト情報の更新は、オブジェクト指標の更新のみでよい。

3.2 範囲問合せの実行

範囲問合せの中心としてのノードとノードがらネットワーク上を經由して到達する距離の上限としての r が与えられる。

前節で、領域のオブジェクトに対する指標を付加した領域分割木に対して、範囲問合せを実行する。この範囲問合せは、事前処理と精選処理の二段階に分けることができる。図 7 は、範囲問合せの中心点と距離 r を示し、各母点領域を矩形で表す。同時に、各色は事前処理での判定結果の違いを示す。

{ 事前処理 }

[1. 中心点を含む領域 (緑)] この領域においては、 G_{l_1} での中心点の所属母点の持つ境界点までの経路と距離を求め、前章の領域の統合と同様の処理を繰り返し、最遠の境界点までの距離が、 r 以上にならない階層を発見する。

[2. 中心点から距離 r までに完全に含まれる領域 (赤)] 緑の領域から、各母点領域の大きさの指標を用いて、距離を算出し完全に包含されるかを判定し、領域を決定する。

[3. 中心点から距離 r の位置にある領域 (青)] 中心点から、各領域を經由した大きさの指標が、自領域到達前は r 以下で、到達後は r 以上になる領域は、階層を下げ、2 の判定を行う。もし該当領域の存在する領域が G_{l_1} での判定だった場合、中心点からの距離 r の位置にある領域と決定する。

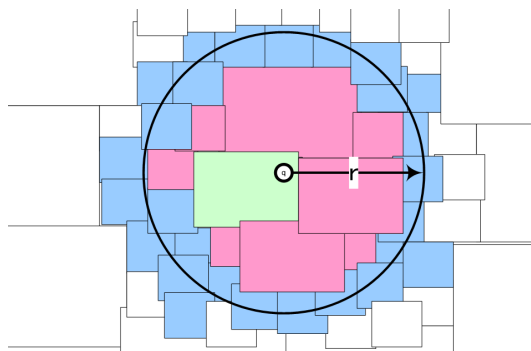


図 7 範囲 r に含まれる各階層の部分領域の結合

Fig.7 Merge of subregions included in a given querying circle (radius r) in each layer

[4. 中心点から距離 r 以上に遠い位置にある領域 (白)] 青領域よりも中心点からの距離が遠い領域は、計算する必要のない領域なので、精選処理を実行する必要のない領域とする。

{ 精選処理 }

[1] 事前処理 3 での領域に存在するオブジェクトに対し、その母点領域のもつ境界点までの経路と距離を算出する。

[2] 緑の領域では、中心点から境界点までの経路。赤の領域では、境界点間経路。青の領域では、境界点からオブジェクトまでの経路。この 3 つの経路を統合し、最短の経路 r 以下になるか判定する。

[3] 2 までの処理で r 以下になったオブジェクト数・赤の領域でのオブジェクト数と緑の領域でのオブジェクト数を解とできる。

[注] 中心点からオブジェクトまでの経路を求めるのは、青領域以外のものは、他の方法が必要となる。

4. 関連研究

これまで、道路網モデルとして、交差点をノード、道路片をエッジとした重み付きグラフを用いた、多数の距離索引付け手法が提案されている。

Kolahdouzan ら [4] は、ネットワークボロノイ図による領域分割を用いて、 k -NN 問題の効率的な計算法を提案している。同手法では、索引化の対象の位置を基準にグラフを生成している。このため索引の対象の種類毎にグラフを生成する必要がある。また、索引化の対象毎のグラフは互いにまったく異なり、階層化などを適用する構造となっていないため、 k -NN 以外の道路網応用へ容易に適用できない。

Kriegel ら [3] は、前処理として、参照点をグラフに埋め込み、すべての索引化の対象からの距離を予め計算して、ベクトル空間に写像することで、DRQ と k -NN に適用している。参照点までの距離を基準に距離を見積り、フィルタリングと精選の 2 段階探索により高速化している。

これらに対して、提案手法では、ネットワークボロノイ分割を利用しながら、平面グラフに SkipList [9] の考え方を応用して、ノードのランダム選択と、領域分割・統合を組み合わせるボトムアップに木構造を生成している。この木構造は、領域の包含関係を考慮した平衡木となっている。

また、ネットワークボロノイ図を用いて平面グラフのノードの位置関係に基づいてグラフを分割することは、エッジに付けられた距離情報をもとに、大まかに抽象化した地図を構成することに相当する。

5. 終わりに

本稿では、原地図に対して提案している領域分割木の構成方法を簡単に説明し、範囲問合せへの応用について議論した。領域分割木は、境界点を結ぶエッジの包含関係と長さに基づいて生成される特徴を持つため、木の生成と範囲問合せが、境界点エッジのリスト統合操作に帰着されることを示した。

今後の課題として、提案領域分割木での範囲問合せを用いた評価、領域分割木の並列生成法の検討、最短経路探査・範囲問合せ以外の様々な探査での応用、アドホックな環境を想定した領域分割木の生成と利用などが考えられる。

文 献

- [1] Samet, H.: *Foundations of Multidimensional And Metric Data Structures*, Morgan Kaufmann (2006).
- [2] Sankaranarayanan, J., Alborzi, H. and Samet, H.: Efficient Query Processing on Spatial Networks, *13th ACM International Workshop on Geographic Information Systems*, pp. 200–209 (2005).
- [3] Kriegel, H.-P., Kroger, P., Kunath, P., Renz, M. and Schmidt, T.: Proximity Queries in Large Traffic Networks, *15th ACM International Symposium on Advances in Geographic Information Systems* (2007).
- [4] Kolahdouzan, M. and Shahabi, C.: Voronoi-based K Nearest Neighbor Search for Spatial Network Databases, *30th International Conference on Very Large Data Bases*, pp. 849–851 (2004).
- [5] 蒲原智也, 上島紳—ネットワークボロノイ図を用いたグラフ分割木の提案と最短経路への応用, データベース学会論文誌, Vol. 7, No. 1, pp. 193–198 (2008).
- [6] Erwig, M.: The Graph Voronoi Diagram with Applications, *Networks*, Vol. 36, No. 3, pp. 156–163 (2000).
- [7] Okabe, A., Boots, B., Sugihara, K. and Chin, S. N.: *Spatial Tessellations: Concepts and Applications of Voronoi Diagrams*, pp. 218–224, John Wiley & Sons Ltd, 2nd edition (2000).
- [8] Graf, M. and Winter, S.: Network Voronoi Diagrams, *Österreichische Zeitschrift für Vermessung und Geoinformation*, Vol. 91, No. 3, pp. 166–174 (2003).
- [9] Pugh, W.: Skip Lists: A Probabilistic Alternative to Balanced Trees, *Communications of the ACM*, Vol. 33, No. 6, pp. 668–676 (1990).